

Análisis de una Esfera con Rugosidad Específica en una Turbina Eólica de Eje Vertical

Molina Crisóstomo, J; Olivares Gómez, M; Colin Martínez, J, L; Gómez, Bautista, J, R

Resumen: La implementación de energía eólica como fuente de generación de energía eléctrica, se ha llevado a cabo durante largo tiempo y durante algunos años a resultado factible y sostenible, sin embargo, con el alza en la demanda del recurso eléctrico, el nuevo reto a vencer es implementar innovaciones a los aerogeneradores para hacerlos más eficientes y por lo tanto aumentar la generación de esta.

Por lo que se ha propuesto implementar una esfera con rugosidad específica, tomando como fundamento el efecto Magnus, presente en las pelotas deportivas, además de otro tipo de implementaciones presentes en el área de la mecánica e hidráulica, esperando que con el primero aumente el coeficiente de sustentación y disminuya el de arrastre.

Mientras que con la segunda implementación ocurra lo contrario. Para corroborarlo se utilizará un diseño tridimensional, además de un análisis CFD con el software ANSYS, considerando tres velocidades del viento de acuerdo con la zona de estudio, que en este caso es el centro de investigación CIATEQ unidad Jalisco.

Palabras clave: CFD (Computational Fluid Dynamics), rugosidad, coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación, efecto Magnus.

Introducción

Son ya conocidos los repetidos esfuerzos de la humanidad por migrar a las energías limpias, llevando a cabo distintos foros, congresos y acuerdos donde se discute la forma de mitigar las consecuencias de la sobreexplotación de las energías provenientes de fuentes fósiles, podría decirse que la transición ha sido lenta, por no decir que casi nula, hablando de México, ya que de acuerdo a Ley de Transición Energética (LTE), para el año 2018 se debió de haber tenido una generación de energía por medio de fuentes limpias de un 25%, sin embargo, de acuerdo al Reporte de Avances de Energías Limpias (RAEL) solo se llegó al 22.20% (SENER, 2020).

Hablando exclusivamente de la energía eólica, misma que se obtiene gracias al aprovechamiento del viento y su transformación a energía eléctrica, es sabido que las fuentes más aprovechadas son aquellas donde este recurso tiene altas velocidades, dejando de lado las zonas con velocidades que no cuentan con dichas condiciones.

Como propuesta para aprovechar de mejor forma este recurso, se plantea el uso de esferas con rugosidad específica, teniendo como base las pelotas deportivas, específicamente las pelotas de golf y voleibol, esto con la finalidad de aumentar el coeficiente de sustentación.

Con el fin de obtener resultados en un menor periodo de tiempo y con un gasto monetario mínimo, se establece el uso de herramientas computacionales para llevar a cabo el diseño y análisis CFD, con los cuales se obtendrá más información al tener parámetros controlados, que, si bien son métodos analíticos y numéricos aproximados, ofrecen un resultado más acertado del fenómeno estudiado antes de realizar la fase de manufactura. (Fernández Oro, J.M., 2012)

Antecedentes

Para poner en práctica las teorías mencionadas anteriormente se utilizó como base los estudios ya existentes en torno a las pelotas deportivas, como lo menciona Bush (2014), donde explica que la gran mayoría de los balones poseen rugosidades, las cuales afectan las propiedades aerodinámicas y dinámicas, por lo tanto, afectan las características de rendimiento de la pelota o balón, según sea el caso (Mehta et al. 2008).

Hablando específicamente de los balones de voleibol, se menciona que el rango del número de Re que tienen para alcanzar la crisis de resistencia, se encuentra ente 250000 y 330000, se entiende como crisis de resistencia el punto máximo de resistencia en la pelota que posteriormente comienza a disminuir en gran medida, al ser comparado con los balones, lisos y con acabado de panel de abeja, que es un modelo más reciente, para este último se demostró que el número de Re crítico necesario para reducir el arrastre es menor (Asai et al., 2010).

Mientras que con las pelotas de golf se descubrió que los alveolos proporcionaban un mejor control en la trayectoria, vuelo y giro, en comparación con pelotas de las mismas dimensiones, pero con una superficie lisa (Ortiz et. Al, 2021).

Esto se debe a que la rugosidad crea una capa límite turbulenta para Re más bajos, dando como resultado que el fluido se separe más atrás del cuerpo, estrechando a su vez la estela y reduciendo el arrastre gracias al cambio de presión.

Teniendo estas consideraciones presentes, se estableció el diseño de tres esferas, basadas en las pelotas de golf británicas, otra basada en las pelotas americanas y finalmente una esfera basada en las pelotas de voleibol.

Para llevar a cabo el análisis computacional se utilizó el software ANSYS Fluent, ya que este permite introducir geometrías complejas y mediante una serie de iteraciones, arrojar como resultado el comportamiento teórico que tendría el fluido alrededor de la geometría que se está analizando; sin embargo, al utilizarlo hay que tener en cuenta las diferentes variantes que ofrece, además del proceso que se debe llevar a cabo para tener un correcto análisis, los cuales se resumen en dimensionamiento, diseño y delimitación de la geometría, mallado y refinamiento, selección del modelo matemático de turbulencia y determinación de las condiciones de inicio y condiciones de frontera, determinación del número de iteraciones y límites de convergencia, obtención de datos e interpretación de resultados. (Bakker, 2008)

Descripción del método

Diseño tridimensional

Para el diseño de estas esferas se consideró un diámetro de 1m, considerando que, de llevarse a una prueba real, pasando por un proceso de manufactura, será en zonas de baja velocidad, por lo que se debe evitar que el modelo tenga un peso excesivo.

Diseño 1: Esfera con Alveolos Americana (EAA)

Para los primeros dos casos se utilizaron como referencias la superficie de las pelotas de golf, obteniendo así dos variantes, pues las pelotas más utilizadas con las que se rigen por normas americanas y las regidas por normas inglesas, con 336 y 330 alveolos respectivamente. Para que se pudiera llevar a cabo el diseño de la esfera EAA se consideró tanto el reglamento de The United States Golf Association como la patente de Badke (1982), en la cual se establece el diámetro y profundidad que comúnmente se utilizan en las pelotas de golf.

Con el fin de ajustar el diseño lo más posible a una pelota real, se utilizó una relación entre diámetros de una pelota común y la esfera diseñada, dando así una relación de un diámetro 23.4 veces mayor a la pelota de golf, pues el diámetro de una pelota de golf es 42.65 mm, considerando que en un futuro y de tener resultados favorables, el diseño podría llevarse a la manufactura, se tomaron los valores de profundidad y diámetro de alveolo máximos, tal como se aprecia en la Tabla 1.

	<i>Pelota</i>		<i>Alveolos</i>			
	Diámetro [mm]	Cantidad	Diámetro [mm]		Profundidad [mm]	
			Min.	Max.	Mín.	Máx.
<i>USA</i>	42.65	336	0.508	2.032	0.0508	0.3556
<i>Diseño 1</i>	1000	336	11	47.6	1	8.3

Tabla 1 Relación de medidas entre alveolos en pelotas de golf americanas y diseño EAA.

Con motivo de obtener la separación que debía existir entre cada alveolo, se obtuvo el área de la esfera, de 3.1416 m², al tener en cuenta que el área total ocupada por alveolos será de 0.6 m², se tiene como resultado que existe un área sobrante de 2.54 m², dentro de la cual se establecieron grados de separación horizontal y vertical, de acuerdo con el diámetro y con las consideraciones establecidas en la patente 4 346 898 de los Estados Unidos, la cual dicta que no es necesario que los alveolos estén ordenados de forma simétrica.

Para el acomodo de los alveolos en el eje vertical, sobre el eje Y, se aplicó la longitud de arco, la cual estaba dada por el diámetro total que le fue asignado a cada alveolo que es 109 mm; el radio, r , por el radio de la esfera; siendo n° el número de grados de separación entre ellos; esto dio como resultado un ángulo máximo de 12.5°, y como ya se había mencionado la falta de simetría en la esfera, los ángulos fueron variando para cumplir con la característica de 336 alveolos.

Mientras que para la separación de alveolos en el eje X, de utilizó la Ley de Senos, siendo necesario conocer la distancia Z sobre el pleno (Y, Z) a la que se encontraban los alveolos, tomando en cuenta un diámetro máximo entre el alveolo y el espacio de separación de 100 mm, considerando un margen de error de 8% al no tener una superficie cuadrada.

Una vez obtenidos estos resultados, se vuelve a aplicar la fórmula para calcular la longitud de arco, obteniendo así el ángulo de separación de forma horizontal y el número de alveolos que debe tener cada línea, dando como resultado el modelo de la Figura 1.

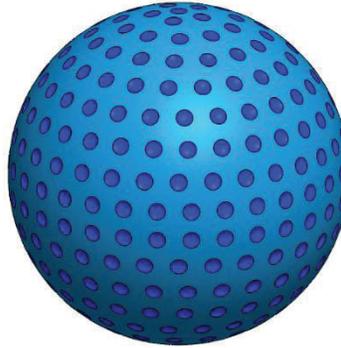


Figura 1 Esfera con Alveolos Americana.

Diseño 2. Esfera con Alveolos Inglesa (EAI)

Para el segundo diseño se aplicaron las mismas dimensiones de diámetro y profundidad que en EAA, así como las mismas fórmulas para el acomodo en los ejes X y Y, sin embargo, debido a que la cantidad de alveolos disminuyó, se tiene una ligera separación extra entre ellos de forma horizontal y vertical, es decir sobre el eje X y Y respectivamente.

Visualmente no se logra apreciar una gran diferencia entre el diseño EAI y el diseño EAA, no obstante, esto representa un cambio importante en los análisis CFD.



Figura 2 Esfera con Alveolos Inglesa.

Diseño 3. Esfera con Barreno (EB)

Como se había mencionado anteriormente, se utilizó también como base el diseño de una pelota de voleibol, utilizando un metro de diámetro, este balón está dividido en seis secciones, orientados aleatoriamente, sin embargo, en este diseño solo se dividirá la esfera en cuatro secciones, y no en seis como los balones de voleibol, pues en las otras dos secciones no impactaría favorablemente el viento y sería las secciones para el eje.

Para simular las líneas en los balones de volibol, se utilizaron barrenos, los cuales toman su profundidad de los valores obtenidos al diseñar la EAA, iniciando en 8 mm con ancho aproximado de 50 mm, el cual iba disminuyendo hasta una profundidad de 1 mm y un ancho de 40 mm, asimismo se utilizó el dato de separación entre alveolos e inclinación de los mismos. El barrenado mencionado anteriormente se hizo en los primeros 80° girando sobre el eje Y de revolución, dejando 10° de espacio. Esto dio como resultado 7 barrenados en lo largo del eje Y como se observa en la Figura 2.

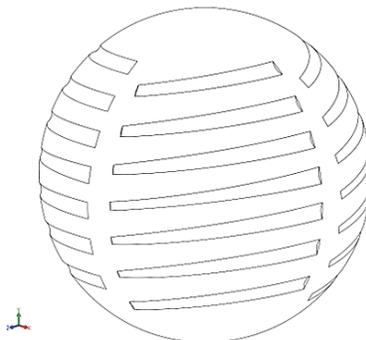


Figura 3 Esfera con Barrenos.

Análisis CFD

Una vez determinadas las geometrías con las que se va a trabajar, se estableció un volumen de control donde fuera posible apreciar la estela que el movimiento de la esfera producirá, para esto se determinó un prisma rectangular con medidas de 1.5 veces el diámetro del centro de la esfera a cada lado, 3.5 metros de distancia del centro a la cara frontal y 6.5 metros del centro a la cara posterior.

De acuerdo a las velocidades que se presentan en el área de estudio, se estableció hacer un análisis a 2.54, 6.3 y 10 m/s, mismas que se establecieron en las paredes del volumen de control, con el fin de simular un flujo libre y las cuales tienen la misma dirección que el flujo principal. Asimismo, por la zona en la que se establece el estudio, se calculó la densidad y viscosidad dinámica del aire de acuerdo a la presión y temperatura promedio de la región, dando como resultado $0.992 \frac{Kg}{m^3}$, mientras que la viscosidad dinámica es de $1.824 \times 10^{-5} \frac{Kg}{ms}$.

Una vez teniendo estos datos se procedió con el mallado de las esferas, para lo cual se utilizó un mallado tetraédrico, de la cual se pueden observar resultados en la Tabla 2, en la cual se puede apreciar la diferencia en la cantidad de nodos y elementos entre cada diseño.

Diseño	Nodos	Elementos
EAA	186 996	1 006 478
EAI	173 104	938 578
EB	126 057	678 838

Tabla 2 Nodos y elementos resultantes.

En dicha tabla se puede apreciar que la esfera que obtuvo una mayor cantidad de nodos y elementos fue la EAA, mientras que la esfera con menor número de nodos y elementos fue la EB, esto debido a la simpleza de su superficie, con respecto a los otros dos modelos.

Una vez terminado este proceso se estableció el utilizar un modelo k-ε standard, con 500 iteraciones cada una, con los valores de densidad, viscosidad dinámica y velocidad del viento antes mencionados. Se establece que al llevar a cabo las iteraciones también se haga un análisis del coeficiente de sustentación y arrastre en la superficie de la esfera, por lo que se toma como válido el análisis una vez que las gráficas de dichos coeficientes son visiblemente estables. Para evitar que las iteraciones se detuvieran antes de lo deseado se modificaron los valores residuales, haciéndolos cercanos a cero.

Comentarios finales

Una vez obtenidos los resultados se procedió al análisis de estos, agrupando los mismo en la Tabla 3.

Diseño	Velocidad	CD	CL
EAA	2.54	0.2387	0.4697
	6.3	2.3678	2.9186
	10	-9.4451	5.5950
EAI	2.54	-2.2000	-0.0946
EB	2.54	-2.1911	-1.2640

Tabla 3 Coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos.

Al observar estos resultados puede afirmarse que tanto el diseño EAI como el EB, no se obtuvieron resultados favorables, ya que en el primero se tienen resultados negativos en los coeficientes de arrastre y sustentación lo cual sugiere que las gráficas de arrastre y sustentación no estaban estabilizadas por completo, por lo cual no se procedió con los análisis a las velocidades posteriores.

Observando la Figura 4 puede apreciarse un aumento de la velocidad en las zonas superior e inferior, lo que podría indicar una aceleración en el movimiento de rotación de dicha esfera.

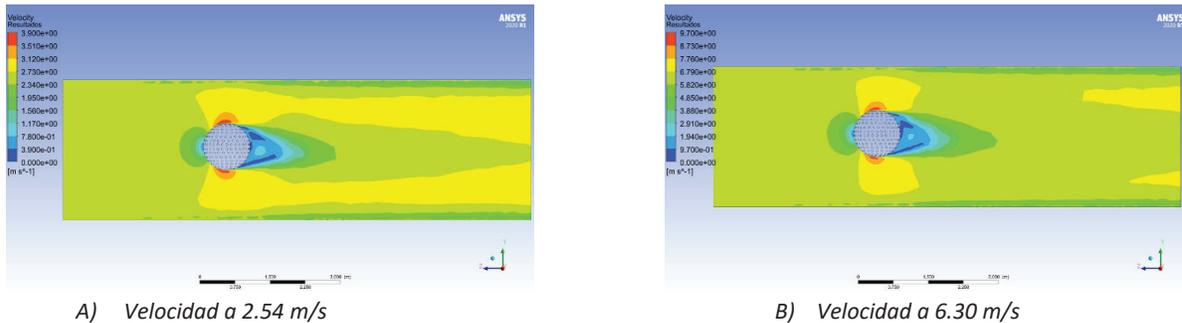


Figura 4 Resultados del análisis de velocidad de viento.

Aunado a la disminución de presión en dichas zonas, tal como puede apreciarse tanto en la como en la Presión a 2.54 m/s

Figura 5.

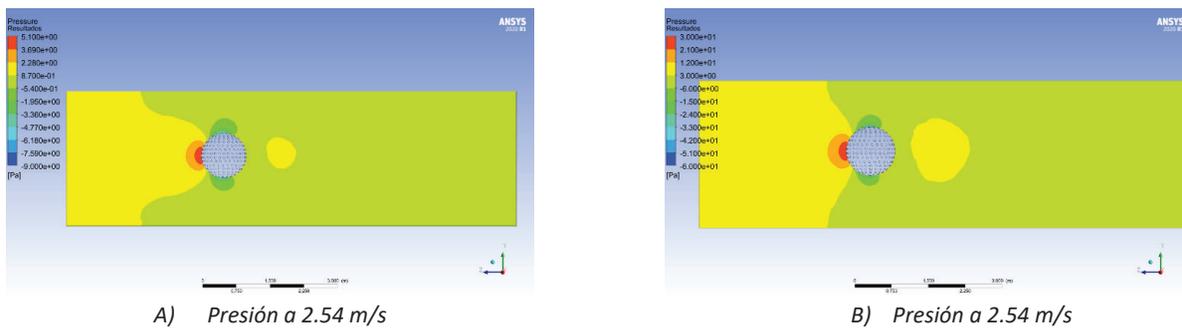


Figura 5 Resultados del análisis de presión.

Finalmente pasando a la

Figura 6, se concluye que hay una mejor adaptación de la capa límite alrededor de dicho diseño.

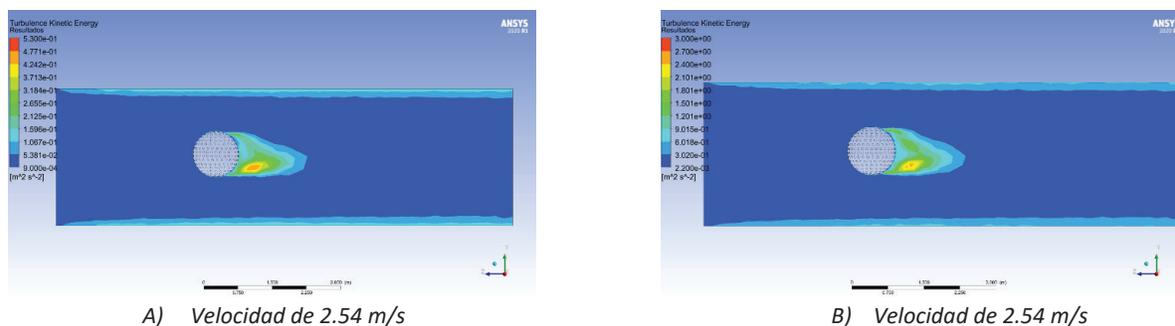


Figura 6 Análisis de energía cinética turbulenta

Conclusiones

Mientras que en la EB no se obtuvieron resultados concluyentes, esto se debe a que en ningún momento se visualizó una estabilización de las gráficas que indicaban el coeficiente de arrastre y sustentación en la superficie de la esfera, de modo que tampoco se procedió con los análisis posteriores.

Como puede apreciarse en la Tabla 3, la única de las tres opciones presentadas que dio resultados fue la EAA, cabe recalcar que si bien, los valores de CD y CL fueron satisfactorios a 2.54 y 6.3 m/s, al tener una velocidad mayor, siendo esta 10 m/s, se obtuvo un valor negativo en el coeficiente de arrastre.

Teniendo como única opción el modelo EAA se compararon los resultados visuales obtenidos para el análisis de la fabricación de la esfera.

Recomendaciones

Cabe destacar que incluso una diferencia de 6 alveolos entre diseños puede hacer un notable cambio en los resultados, como lo fue para esta investigación, por lo tanto, para investigaciones futuras variar la profundidad, el acomodo de los alveolos en incluso la forma, podría mostrar resultados más favorables.

Referencias

- Asai, T., Ito, S., Seo, K. & Hitotsubashi, A. (2010, junio). Aerodynamics of a new volleyball. ELSEVIER. Recuperado 28 de septiembre de 2022, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810002754>
- Badke, F.C., (1982), Putting Golf Ball, (U.S. Patent 4,346,898), U.S. Patent and Trademark Office, <https://patents.google.com/patent/US4346898A/en>
- Bekker, A. (2008). CFD Lectures [Diapositivas; Online]. The Colorful Fluid Mixing Gallery. <https://www.bakker.org/Lectures-Applied-CFD.pdf>
- Bush, J. W. M. (2014, 29 mayo). The aerodynamics of the beautiful game. MIT Libraries. Recuperado 21 de julio de 2022, de <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/87576>
- Fernández, Oro, J. M. (2012). Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos (1.a ed.). Reverte.
- Mehta., R., Alam., F. & Subic., A. (2008, junio). Review of tennis ball aerodynamics. Wiley Online Library. Recuperado 6 de junio de 2020, de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jst.11>
- Ortiz Dosal, L. C., Ortiz Dosal, A., & Kolosovas Machuca, E. S. (2021, 13 julio). Pelotas y aerodinámica. Revista Universitarios Potosinos. Recuperado 12 de julio de 2022, de <https://leka.uaslp.mx/index.php/universitarios-potosinos/article/view/149>
- SENER. (2020). Reporte de Avance de Energías Limpias. Anexo II. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/610964/Cap10_-_Marco_Juri_dico_Reporte_Avance_de_Energi_as_Limpias_WEB.pdf
- The United States Golf Association. (2015). Reglas de Golf. <https://www.usga.org/content/dam/usga/pdf/ReglasDeEspanol/spanishrulesl.pdf>
- Useros, F. J. L. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid, 50(1°), 71–98. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4817473>